Ann. sci. Univ. Fr.-Comté, Besançon, Biologie- Ecologie, **5** (3), 1991-92-93-94-95 : 63-73

Composantes géomorphologiques, géochimiques et climatiques impliquées dans les phénomènes de transferts de matière, d'érosion des bassins versants et de comblement des lacs dans les contextes calcaires francs-comtois

par
Michèle GAIFFE*

RÉSUMÉ

Sur les plateaux calcaires karstiques du Jura, les sols des zones convexes sont superficiels, calciques, riches en M.O et fortement structurés, ceux des dépressions (dolines) sont profonds et acides et contiennent des éléments hérités (horizons enfouis, charbons), témoins d'un remplissage actuellement actif. Les agrégats des premiers ne sont pas détruits mais transportés par l'eau des précipitations. Leur incubation expérimentale en milieu lixivié en calcium provoque leur transformation, par minéralisation de la M.O. et perte de stabilité structurale, qui démontre : 1/ la possibilité d'une érosion sous forme d'agrégats, 2/ la possibilité de filiation entre les deux types de sols.

Les anomalies micromorphologiques (argilanes érodés) et granulométriques (Bt appauvris) des sols de dolines sont à relier à "l'aspiration karstique" qui vide périodiquement les dolines. L'érosion se fait ici en deux étapes : des points hauts vers les dolines et des dolines vers les pièges sédimentaires alluviaux, via les circuits souterrains.

L'étude du remplissage holocène d'un lac de barrage naturel confirme l'origine détritique terrestre de ses composés organiques, particulièrement abondants au cours du subboréal.

Tous ces transferts exigent une composante fortement érosive des précipitations. L'analyse des pluviogrammes des 4 dernières années montre l'existence périodique d'averses exceptionnelles dont l'indice R peut dépasser 250.

On conclut sur le caractère insidieux parce que discontinu d'une érosion qui menace la couverture pédologique très superficielle des plateaux karstiques.

Mots-clés : Erosion karstique - Chaîne de sol - Sédiment lacustre - Indice d'érosivité - Jura.

ABSTRACT

On the calcareous karstic levels of Jura, the soils of convex areas are thin, calcic, humiferous and strongly aggregated whereas dolina soils are deep, acid and sprinkled with inherited elelments such as vegetal residues or small charcoal. The first ones aggregates are not destroyed by the rain but are translated by running water. Incubated without calcic source they lose calcium and organic matter as well as their structural stability. This enable to demonstrate the possible filiation between the soils of the two geomorphological situations.

Dolina soils are moreover submited to a karstic erosion wich carries argilans - and sometimes the whole soil - through karstic drains to alluvial or sedimentary deposits.

Such a sedimentary lacustral deposit, consecutive to a holocen natural dam on the river Doubs has been studied. Its organic compounds are undoubtly of a pedological origin.

These displacements of mater can only occur if the rain has a sufficient erosive power. Through the analysis of the precipitation during the last four years we can see the occurency of periodical and very strong shower with an erosivity index higher than 250.

So it is shown that soil erosion on Jura plateaus is an insidious, because non continuous, phenomenon. However, it represents a real threat for their thin pedological cover.

Key-words : Karstic erosion - Catena - Lake sedimentation - Erosivity index - Jura.

INTRODUCTION

Les nombreux travaux de pédologie conduits en Franche-Comté ces dernières années n'avaient pas pour objet l'étude de l'érosion. Ce processus était traditionnellement considéré comme peu probable, dans une pays que sa couverture végétale dense, tant forestière que prairiale, était censée protéger. Or l'accumulation d'observations convergentes a fini par démentir cet optimisme. C'est l'ensemble de la démarche qui a conduit à la prise de conscience puis à l'étude des transferts de matériaux pédologiques sur les plateaux calcaires francs-comtois, que nous nous proposons de résumer dans ces lignes.

A. LES TRANSFERTS DE MATIÈRES AU SEIN DE LA COUVERTURE PÉDOLOGIQUE

A. Le contexte

Les plateaux calcaires de l'Est de la France sont soumis à un **climat tempéré humide,** globalement de régime atlantique, avec des pluies réparties sur

* Laboratoire de Pédologie, Universié de Franche-Comté, F-25030 Besancçon Cedzx, France

l'ensemble de l'année. Mais une tendance continentale s'exprime, d'une part au niveau des pluies d'été à caractère orageux violent et d'autre part au niveau des contrastes thermiques importants (50°C d'écart entre le jour le plus froid et le jour le plus chaud).

Leurs calcaires durs en bancs puissants sont affectés par une tectonique cassante qui se traduit par des réseaux serrés de failles (plateaux), des plis-failles, des anticlinaux "coffrés" à sommet plat (faisceaux) ainsi que par un diaclasage intense des bancs (Gaiffe et Bruckert, 1992).

L'hydrologie liée à ce contexte relève du **modèle karstique,** avec infiltration verticale des eaux par des fissures et des pertes (photo 1), qui alimentent des réseaux souterrains complexes d'où les rivières souterraines émergent à l'air libre par des résurgences.

Le karst se traduit en surface par une grande variété des **formes physiques des bancs** calcaires (dalles plus ou moins fissurées, calcaires concassés, lapiez) et par des effondrements (dolines, réseaux de dolines, vallons secs). Les vastes plateaux offrent ainsi des paysages globalement tabulaires mais où alternent - à toutes échelles - des bosses et des creux, des zones convexes et des dépressions.

Dans les secteurs de karst actif, les **sols des zones convexes** sont superficiels et caillouteux. Deux grands types se partagent le domaine agro-pastoral. Sur les calcaires concassés on trouve des sols **humo-calciques** (Bottner, 1971) très humifères, non calcaires, à grumeaux fins très stables, parsemés de cailloux décimétriques anguleux (fig.1 ; photo 2). Sur les dalles se développent des **sols bruns à pellicules calcaires** (Bruckert et Gaiffe, 1980) brun jaunâtre sombre, dans lesquels les cailloux détachés de la dalle abandonnent contre leur moule terreux une pellicule d'altération constituant le seul site carbonaté. Les sols de dépression par contre ont généralement une profondeur supérieure à un mètre. Ils sont jaunâtres, limono-argileux, acides, dépourvus d'éléments grossiers.

Force est donc d'admettre un remplissage. On invoquait jusqu'ici un remaniement tardi-glaciaire du matériel éolien déposé sur le Jura après la fonte des glaces (Pochon, 1978). Or de nombreux sondages nous ont permis d'y voir, en plus, les manifestations d'un **remplissage récent** ou actuel (Gaiffe et Bruckert, 1985). Ce sont en particulier :

— des horizons enterrés, certains contenant encore du matériel végétal bien reconnaissable, donc enfoui récemment, entre 5 et 25 cm de profondeur (fig.1) ;

— en forêt, des places à feu recouvertes de terre et même un cas de superposition de 3 couches charbonneuses - révélant 3 épisodes de feux - séparées par une vingtaine de cm de limons (la datation ^{14}C place la couche profonde vers l'an mil de notre ère) ;

— des tessons de céramiques gallo-romaines sous 60 cm de sol (forêt de Chailluz).

C. Les remplissages "anormaux"

Une situation contradictoire existe cependant dans certains secteurs de montagne à sols argilo-limoneux humifères (sols humo-calciques), dont les dolines ont des sols limono-argileux jaunâtres peu humifères. Leurs matériaux peuvent-ils venir des points hauts ? Sous quelle forme ? Après quelles transformations ?

1. Les sols humo-calciques face à l'érosion

D'une manière générale, l'érosion par l'eau procède d'abord par destruction de la structure du sol puis par entraînement latéral des particules. Or les sols humo-calciques possèdent un complexe argilo-humique auquel le "pont cationique" calcique confère une très forte stabilité (Tab.I) (Gaiffe, 1987). Si transfert de matériaux il y a, il ne se produit donc pas à l'état de

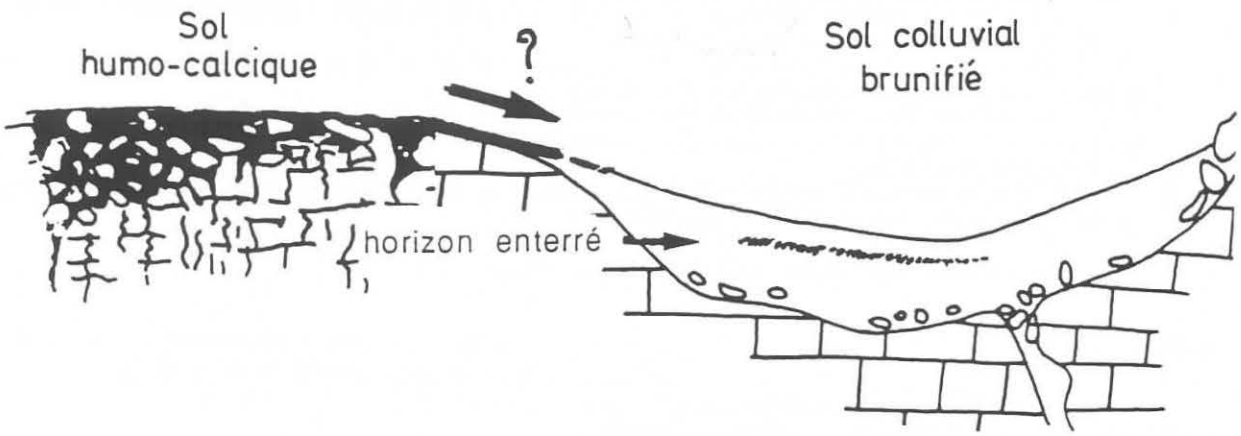

Figure 1 : Zone convexe à sol humo-calcique et doline à sol colluvial brunifié, présentant un redoublement d'horizon A_1. La filiation entre les 2 sols est-elle possible ?

B. L'origine des sols de dolines

La profondeur des sols de dolines apparaît partout supérieure aux possibilités d'une pédogenèse *in situ* et ceci est particulièrement démonstratif dans les zones où les glaciations würmiennes ont arraché la couverture pédologique (au-dessus de 700 m d'altitude).

particules dissociées par la pluie. Peut-il affecter des unités structurales intactes ? On peut remarquer qu'après les pluies violentes, les dépressions contiennent d'importantes quantités de terre de la couleur des sols environnants. Dans les zones à sols humo-calciques, il s'agit d'un sédiment noir, que nous avons recueilli dans les surcreusements de chemins à ornières.

Sols (n°s)	Matière organique %	Densité apparente	Ca 2+ méq/100 g	Stabilité structurale			
				Agrégats ±sables > 200 µm %	Sables > 200 µm %	Particules dispersées < 50 µm %	Indice Is
Humo-calcique 115	48,2	0,6	56,0	83,2	0,5	0,36	0,004
Humo-calcique 073	37,8	0,6	59,5	68,9	1,2	0,34	0,005
Humo-calcique 068	29,6	0,6	60,0	70,5	1,2	0,36	0,005
Humo-calcique brunifié 062	23,0	0,7	33,2	77,5	1,1	0,6	0,007

Tab. I : Caractères analytiques et stabilité structurale de quelques sols humo-calciques du Jura (Indice Is selon hénin, après traitement au benzène).

Nous avons pu constater (Gaiffe, 1990) qu'**il s'agit d'agrégats**, ayant conservé une bonne stabilité structurale (Is compris entre 0,094 et 0,120). La comparaison granulométrique avec les sols voisins (Tab.II) met en évidence, dans le sédiment, des taux d'argile et de matière organique semblables à ceux des sols, un doublement des limons fins et une forte diminution des sables. Ceci permet de conclure à des modalités de transfert qui, d'une part, affectent de façon parallèle argiles et composés humiques, (donc des agrégats argilo-humiques), d'autre part mobilisent des limons fins à l'état particulaire et enfin épargnent les particules les plus grossières.

2. Les agrégats humo-calciques face à un nouvel environnement

Dans les dolines on ne retrouve pas les agrégats humifères dont on vient de démontrer le transport. Seraient-ils "détruits" par le milieu qui les accueille ?

Nous avons émis l'hypothèse qu'en arrivant sur un sol acide et dépourvu de cailloux, ces agrégats, soumis à la lixiviation, et n'étant plus réalimentés en calcium, finissaient par s'appauvrir en cet élément et par se transformer. Pour le vérifier, l'expérience suivante a été réalisée (Duquet, 1989 ; Gaiffe *et al.*, 1984).

Des agrégats humo-calciques sont répartis dans une série d'entonnoirs en verre fritté et mis en incubation à l'étuve à 28°C, dans des conditions optimales d'humidité pendant 25 semaines (fig.2). Chaque mois, un échantillon est sacrifié pour analyse, les autres sont percolés à l'eau distillée.

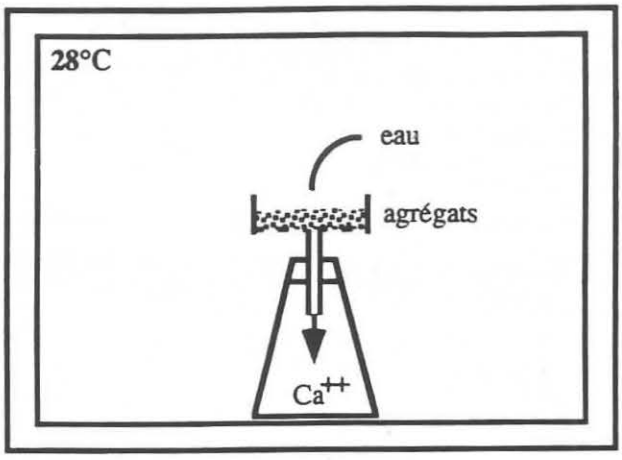

Figure 2 : Dispositif d'incubation et de percolation d'agrégats humo-calciques (2 x 6 échantillons).

	Matière organique %	Fraction minérale %		
		Argile < 2 µm	Limons fins 2-20 µm	Limons grossiers et sables 20-2000 µm
Sol n° 115	42,8	53,8	19,6	26,6
Sédiment	44,0	43,7	42,3	14,0
Sol n° 73	37,8	49,3	25,8	24,9
Sédiment	36,2	51,5	41,1	7,4
Sol n° 68	29,6	59,6	28,3	12,2
Sédiment	32,3	43,5	50,2	6,3
Sol n° 62	23,0	54,2	29,2	16,6
Sédiment	35,7	48,5	44,7	6,8

Tab. II : Comparaison entre les sols humo-calciques et les sédiments déplacés, recueillis dans des ornières. (composition granulométrique après traitement H2 O2).

Les protons produits par l'activité de la microflore déplacent alors le calcium du complexe absorbant. Celui-ci est lixivié par l'eau de percolation et on voit diminuer parallèlement les taux de calcium et de matière organique (fig.3), tandis que de l'azote minéral est recueilli dans les percolats. La minéralisation, qui affecte entre autre les ciments humiques des agrégats, a des conséquences spectaculaires sur la stabilité structurale. L'analyse granulométrique périodique, effectuée sans destruction des ciments organiques, indique une quantité croissante d'argile au cours du temps. A la fin de l'expérience, le taux d'argile dispersée par minéralisation "biologique" tend vers le taux réel obtenu par un méthode classique utilisant un traitement à l'eau oxygénée (fig.4).

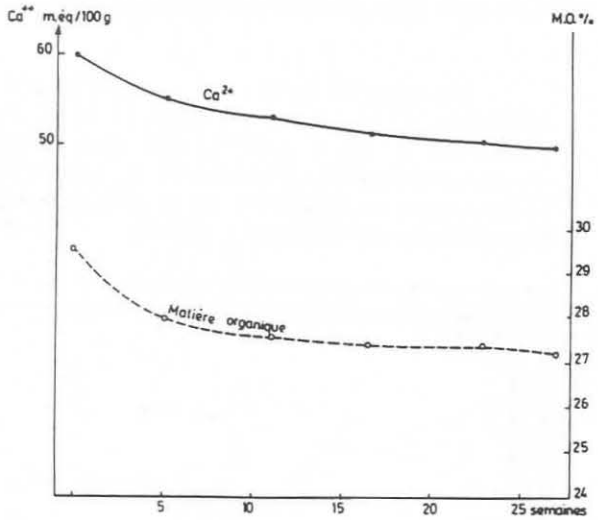

Figure 3 : Evolution des taux de matière organique et de calcium au cours de l'incubation d'agrégats humo-calciques.

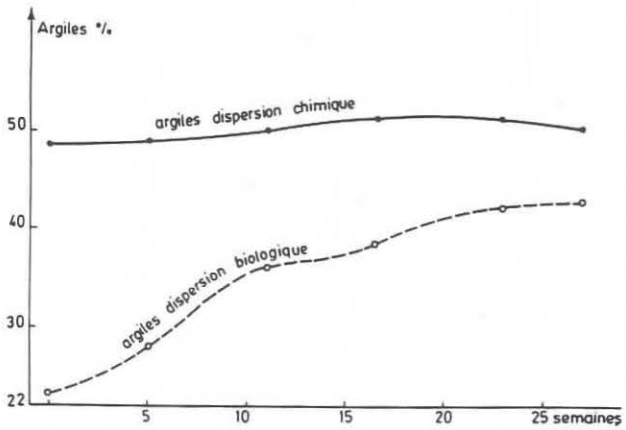

Figure 4 : Evolution du taux d'argile dispersée, après agitation de l'échantillon au cours de l'incubation. 1. par voie biologique. 2. par voie chimique (H_2O_2).

D. Le soutirage karstique

Les agrégats, appauvris en matière organique par minéralisation, s'assimilent au sol de doline. Leurs argiles, libérées des structures, deviennent disponibles pour le lessivage. Ce processus, favorisé par la légère acidité du milieu et par l'abondance des précipitations, se traduit par la présence d'argilanes dans les horizons profonds. Mais l'analyse granulométrique ne le confirme pas : le taux d'argiles est, soit constant le long du profil, soit même plus faible dans l'horizon le plus profond (Tab.III) ! Les observations micromorphologiques à ce niveau montrent que les argilanes existent mais sont secondairement affectés de creusements en cupules.

	Horizon	Prof. (cm	A	LF	LG	SF	SG
Doline De Braillans 325 m	A_1	0-20	26,6	43,1	26,6	2,7	0,8
	A_2	20-60	29,1	40,8	26,5	2,7	0,8
	A_2 Bt_1	60-120	29,5	42,2	24,8	2,6	0,8
	Bt_2	> 120	34,0	40,3	24,0	1,0	0,6
Doline De Montarmots 357 m	A_1	0-10	33,7	38,0	24,8	2,7	0,7
	A_{21}	10-50	33,2	41,3	23,2	1,8	0,5
	A_{22} A_2	50-80	33,6	32,7	29,3	3,6	0,8
	Bt_1	80-110	33,1	41,0	23,0	2,3	0,6
	Bt_2	> 110	34,8	43,9	18,8	1,7	0,8
Doline De Lerrieux 1270 m	A_1-IIA_1	0-8	30,1	54,3	12,7	2,3	0,6
	IIA_{21}	8-20	33,9	49,4	13,1	3,3	0,3
	IIA_{21}	20-35	39,4	44,8	13,1	2,2	0,5
	IIA_{22} Bt	35-50	41,8	45,0	9,7	3,2	0,3
	IIA_{23} Bt	50-80	26,9	57,0	11,3	3,7	1,1
	$IIBt_1$ g	80-100	60,0	30,6	5,7	0,9	2,8
	$IIBt_2$ g	> 100	53,3	36,2	9,0	1,5	0
Doline Du Blechnum 180 m	A_1	0-10	32,9	43,7	19,6	3,3	0,5
	A_2	10-30	32,0	45,6	18,2	3,8	0,4
	A_2 Bt	30-60	20,1	43,8	25,9	9,5	0,7

Tab. III : Analyses granulométriques de sols "lessivés" de dolines.

Ces figures, qui se rattachent par leur morphologie à des phénomènes érosifs, suggèrent une érosion du sol "par le fond". Cette hypothèse a reçu confirmation lorsque, en ouvrant une fosse pédologique dans le fond d'une doline (Blechnum, tab.III), on a découvert sous le sol, au-delà d'un lit de cailloux et de blocs instables, une ouverture plus ou moins circulaire affectant le banc rocheux sur une profondeur indéterminée. De l'air très froid circulait dans cette fissure et la flamme d'un briquet, approchée de l'ouverture, s'est trouvée aspirée.

Cette "aspiration karstique" est la manifestation des mouvements d'eau et d'air liés aux circulations souterraines, dont on connaît le caractère sporadique et brutal. La figure 5 illustre l'exemple d'une crue dans une galerie du Verneau (Doubs), faisant passer le débit de 0,2 à 17 m^3 par seconde en moins d'une heure (Aucant *et al.*, 1985). De tels épisodes transforment les réseaux karstiques en conduites forcées et sont suivis d'un effet de "chasse d'eau" qui se répercute sur les sols sus-jacents. Ces phénomènes sont discontinus (fonte des neiges, crues orageuses) et se traduisent par diverses manifestations, allant de l'entraînement des argilanes récents mal consolidés à l'aspiration du sol dans sa totalité, ouvrant ainsi de nouveaux effondrements tels que celui présenté sur la photo 3.

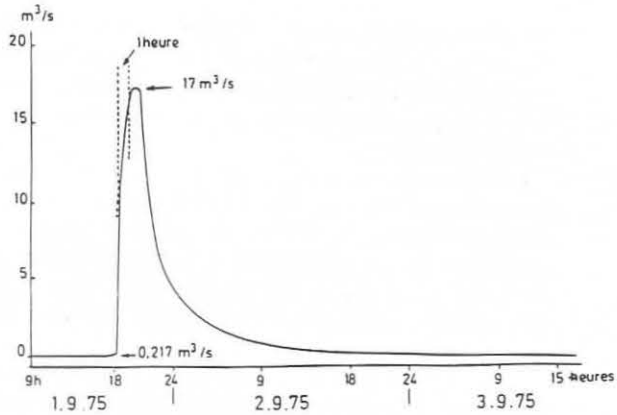

Figure 5 : Une crue du Verneau souterrain, exemple de la brutalité des changements de régimes dans les conduits karstiques.

E. La chaîne de sols du karst (Gaiffe et Bruckert, 1985)

L'ensemble des processus que nous venons de décrire permet de résumer les transferts de matières en zone karstique par un modèle de "chaîne de sol" qui fonctionne en trois étapes, caractérisées chacune par un aspect original :

— l'**érosion** des points hauts, qui peut se faire sous forme d'agrégats ;

— le **colluvionnement** dans les dépressions, où le changement d'ambiance géochimique entraîne la transformation, l'assimilation puis le lessivage des apports ;

— l'**érosion** par le fond, qui provoque la dislocation des argilanes mais aussi la descente progressive ou brutale du matériel pédologique dans le karst.

Les conduits karstiques étant eux-mêmes périodiquement désobstrués par les crues, ce matériel participe à la charge solide des rivières et peut sédimenter à la faveur de sites de décantation, plaines alluviales ou pièges lacustres. C'est l'un de ces sites-pièges qui nous a permis de confirmer les phénomènes décrits ci-dessus.

II. LES TRANSFERTS A L'ÉCHELLE D'UN BASSIN VERSANT

A. Le matériel d'étude : le lac de Chaillexon (Campy *et al.*, 1985)

Au début du tardi-glaciaire würmien, soit 15.000 ans B.P., un éboulement rocheux a obstrué la haute vallée du Doubs près de Morteau (altitude 750 m), créant un lac de barrage naturel qui s'est progressivement comblé par les apports de la rivière et des pentes (Campy *et al.*, 1985). Le bassin versant évalué à 630 km² alimente un piège sédimentaire de 6 km² (Rémy, 1989) dans lequel 50 millions de m³ de matériaux se sont accumulés, laissant actuellement un lac résiduel de 6 millions de m³*.

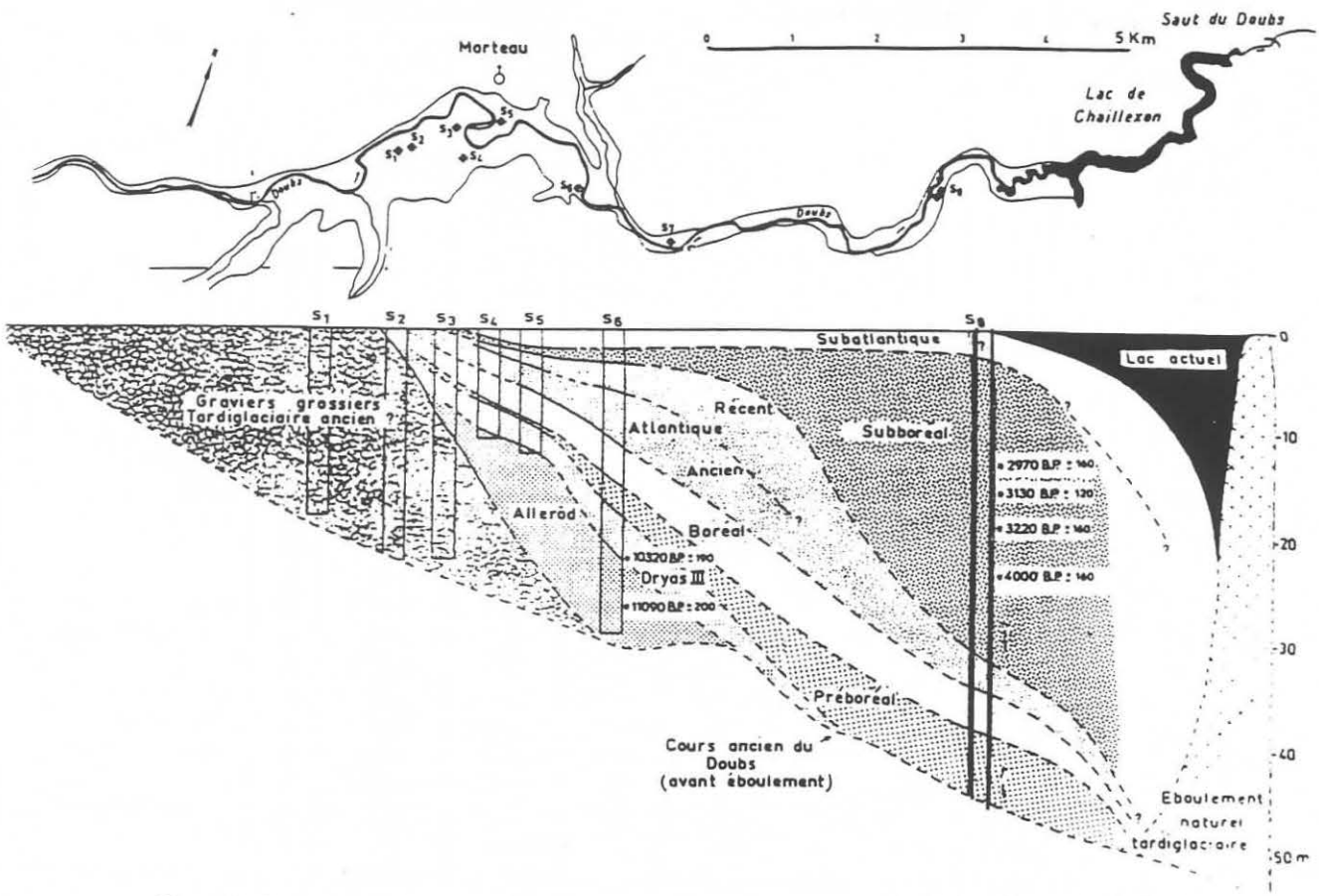

Figure 6 : Remplissage du lac de barrage naturel de Chaillexon au cours de l'holocène (Campy *et al.*, 1985).

* Les observations effectuées sur ce système de lac - rivière de barrage ne sont pas généralisables aux "vrais" lacs jurassiens.

Les études lithologiques, les analyses polliniques et les datations ^{14}C ont permis de reconstituer avec précision la chronologie du remplissage (fig.6). Le sondage S 8, indiqué sur la figure 7 et qui atteint 43 mètres de profondeur, a été étudié sur des prélèvements effectués sous les 50 centimètres.

Il s'agit d'une série détritique fine, de teinte grisâtre, dans laquelle se combinent 3 fractions : les carbonates, la matière organique et la fraction minérale non carbonatée qu'on peut assimiler aux argiles. Dans la fraction organique, on a pu séparer, grâce à la méthode de fractionnement au dithionite (Bruckert et Gaiffe, 1983), les débris végétaux fins et grossiers (limite à 50 microns) des composés humiques extractibles, soit acido-solubles soit alcalino-solubles.

B. L'origine de la matière organique (Di Giovanni, 1990)

Le tableau IV donne une synthèse simplifiée des résultats obtenus et apporte de nombreux renseignements, qui sont commentés par ailleurs (Di Giovanni, 1990). Dans le cadre présent on peut en retenir que la dynamique du remplissage est passée par différents épisodes, dont certains nous apportent des "signatures" intéressantes.

Les épisodes "L" des périodes boréales et atlantiques sont tout à fait typiques d'une **sédimentation lacustre** en eau calme, avec production de carbonates fins *in situ* et un faible taux de matière organique correspondant à des débris fins et des produits humifiés alcalino-solubles. Les acido-solubles y sont très peu représentés et les argiles ont un taux moyen de 34%.

A partir du subboréal et jusqu'aux épisodes terminaux du comblement, soit entre 26 et 7 mètres, le régime se transforme complètement et devient **"lac-rivière"** (R). Le comblement s'accélère (2,5 m en 1000 ans au boréal, 9,5 m au subboréal), le taux moyen de matière organique est multiplié par 2,7 et les argiles passent à 48%.

Cette période est entrecoupée d'épisodes torrentiels (T) fortement érosifs qui apportent de grandes quantités de produits organiques grossiers, ligneux, donc terrestres, accompagnés de carbonates de nature détritique.

On remarque que tous les épisodes T et R se caractérisent par la présence d'une forte dominance de produits organiques acido-solubles. La phase terminale par contre dans laquelle on décèle un fonctionnement palustre (P) voit à nouveau les produits alcalino-solubles constituer la plus grande fraction organique comme dans la phase L.

Ces observations montrent que la période subboréale a fourni au lac un important matériel sédimentaire, formé de produits organiques humifiés (acido-solubles) et d'argiles. La variation parallèle de ces deux types de produits plaide en faveur d'une arrivée conjointe, probablement sous forme d'agrégats

Profondeur en m.	Ca CO_3 %	Argiles %	M.O. %	Répartition de la M.O. %						
				Débris < 50 υ	*Débris ≥ 50 υ*	*Acido-solubles*	*Alcalino-solubles*			
3- 3,5	38,3	58,0	3,7	31,8	0,5	6,9	60,8	P		
4- 6,5	32,9	67,3	9,3	22,3	1,2	45,4	31,1	R		S
7	58,7	54,1	4,6	53,0	11,2	0	35,8	C		U
7,5- 13,7	46,9	47,2	5,8	22,1	1,5	41,3	35,1	R		B
14	60,0	29,1	10,9	11,4	26,0	50,3	12,3	T	2970 BP	-
14,5- 15,2	49,8	44,9	5,3	22,1	1,5	41,3	35,1	R	±160	B
15,5	56,7	32,4	10,9	11,4	26,0	50,3	12,3	T	3130 BP	O
16- 18	45,0	48,1	6,7	22,3	1,5	47,5	28,7	R	±120	R
18,5	59,2	27,8	12,9	11,4	26,0	50,3	12,3	T	3220 Bp	E
19- 23	50,5	44,3	5,2	22,1	1,5	41,3	35,1	R	±160	A
23,5	73,6	17,2	9,2	12,7	1,5	47,9	10,7	T	4000 BP	L
23,7- 25	46,3	47,5	5,2	22,1	28,7	41,3	35,1	R	±160	
25,5	42,4	50,7	6,9	18,2	1,5	55,9	25,8	R		
26- 27,5	49,1	45,3	5,5	22,1	0,1	41,3	35,1	R		
28- 28,5	58,7	37,2	4,1	52,8	1,5	0	36,0	C		
29- 32,5	47,8	47,4	4,8	22,1	11,2	41,3	35,1	R	4700 BP	
33	65,3	33,0	3,5	64,5	1,5	0	32,4	L	**ATLANTIQUE**	
33,5	62,1	34,8	3,0	33,6	3,5	7,4	55,5	L		
34- 36	69,6	28,2	2,2	64,5	3,1	0	32,4	L	8000 BP	
36,5- 37	64,8	33,0	2,1	33,6	3,5	7,4	55,5	L	**BOREAL**	
38	70,3	28,2	1,5	64,5	3,1	0	32,4	L	9000 BP	
39- 40	55,1	43,5	1,3	42,4	0,6	1,0	46,9	L		
40,5- 41	61,2	37,1	1,7	33,6	3,5	7,4	55,5	L	**PREBOREAL**	
41,5	51,6	43,7	4,7	22,1	1,5	41,3	35,1	R		

Tab. IV : Variations des taux de carbonates, d'argiles et de matière organique et évolution des fractions organiques dans le sédiment lacustre (d'après Di Giovanni, 1990). Interprétation des phases de sédimentation (R = rivière, L = lac, T = torrent, C = crue, P = marais).

argilo-humiques. La pyrolyse Rock-Eval (Espitalié *et al...*, 1977) attribue d'ailleurs une origine très majoritairement terrestre aux produits organiques du sédiment (Di Giovanni, 1990). Cette hypothèse est confortée par le fait qu'après l'optimum climatique de l'atlantique qui a favorisé le développement des sols, l'apparition au subboréal d'une sédimentation de produits argilo-humiques correspond aux premiers défrichements néolithiques. Les phases torrentielles échelonnées entre 4000 et 3000 BP seraient-elles déjà la réponse aux imprudences des premiers cultivateurs ? Dans une telle hypothèse il faut cependant admettre que les actions anthropiques n'ont de conséquences sédimentaires que si le vecteur eau est capable d'arracher puis de transporter les matériaux, c'est à dire si les précipitations possèdent un "pouvoir érosif" suffisant. S'il est difficile d'en juger pour la période néolithique on peut néanmoins essayer de caractériser la pluviométrie actuelle. La position du Jura comme première barrière sur le trajet des vents océaniques, son altitude et sa morphologie étant restées les mêmes au cours des temps, un certain nombre de comportements climatologiques sont probablement, toutes choses égales par ailleurs, des caractères pérennes de la région.

III. L'ÉROSIVITÉ DES PLUIES DANS LE JURA

Nos études préliminaires sur l'érosion des sols dans le Jura, induites par la convergence des observations pédologiques et sédimentologiques, ont pris pour base "l'équation universelle de perte de sol" définie par Wischmeier et Smith (1960, 1962, 1965). Dans cette équation, l'indice R d'érosivité des pluies est particulièrement déterminant (Charles et Gaiffe, 1990). Il est obtenu par une équation paramétrique basée sur les caractéristiques des précipitations et nécessite le dépouillement des pluviogrammes sur de longues périodes. On trouvera dans Laurant et Bolline (1976) la méthode de calcul ainsi qu'une application à 40 années de pluies en climat tempéré humide de régime atlantique. Pour la Belgique, ces auteurs trouvent un indice d'érosivité annuel moyen relativement faible (39) avec, pour l'averse la plus violente, une valeur extrême de 73. Pour la France, la carte d'érosivité établie par Pihan (1978) attribue au Jura un indice R moyen de 50 à 75 (en l'absence de données locales).

1. Choix des critères retenus

Pour cette étude, nous avons retenu 5 stations météorologiques, l'une de basse altitude (Montbéliard, 318 m), deux autres sur le Deuxième Plateau (Bonnevaux, 840 m et Pontarlier, 830 m) et deux dans le Haut-Jura (Les Fourgs, 1092 m et Chaux Neuve, 1205 m).

Seuls les événements pluvieux intenses et de plus de 12,7 mm ont été retenus car cette étude ne s'applique par pour le moment aux conditions particulières des sols cultivés à structure fragile, vulnérables à des pluies de faible intensité. Il s'agit surtout de montrer la possibilité des phases érosives violentes alimentant de façon discontinue les fonds de dolines et les pièges lacustres. Le dépouillement des pluviogrammes, effectué à un pas de temps de 6 minutes, concerne les années 1988 à 1991.

2. Quelques exemples de pluies érosives

A titre d'exemple, nous reproduisons (tab.V) les valeurs de l'indice R obtenues pour 2 années consécutives à Chaux Neuve. Respectivement de 487,2 et 49,6, ils rendent bien compte du caractère discontinu des phénomènes liés à un contexte climatique où se manifestent déjà quelques tendances continentales et montagnardes.

Date 1988	Durée de la pluviophase (minutes)	DH (cm)	EG (t.m/ha)	Q max 30	R	
Mai-13	60	1,34	332,5	1,2	8,2	
26	216	4,50	1127,0	2,3	51,4	
27	522	4,94	585,8	1,1	12,6	
Juin-03	528	7,46	1053,0	1,4	29,1	
16	198	7,42	2165,3	5,9	258,1	
Jui-01	276	5,10	1127,4	0,9	21,2	
03	330	6,62	1060,8	1,4	29,3	
Août-02	738	5,34	840,9	1,6	26,9	
Sept-01	1128	8,24	641,2	0,9	11,8	
Oct-03	822	3,44	738,2	1,0	14,5	
05	282	2,40	512,1	0,9	9,2	
09	522	6,16	673,8	1,1	15,1	
Total						**487,4**
1989						
Avr-23	234	3,18	669,6	0,9	12,0	
Août-07	480	2,48	659,2	2,0	26,8	
22	126	1,42	381,1	1,3	10,8	
Total						**49,6**
1990						

Tab. V : Exemple de calcul de l'indice R dans le Jura (Chaux-Neuve) pour les années 1988 et 1989, à partir des seuls pluies de forte intensité.

Localité	Date	Durée de la pluviophase (minutes)	DH (cm)	EG t.m/ha	Q max 30	R
Les Fourgs	22/5/88	66	4,5	1470	4,4	130,5
Chaux-Neuve	16/6/88	198	7,4	2165	6,0	258,1
	27/6/90	480	5,7	1493	3,3	98,5
Bonnevaux	17/7/91	90	7,0	1990	4,4	173,5

Tab. VI : Quelques averses fortement érosives dans divers sites jurassiens. (R d'après Wischmeier).

Quelques indices remarquables sont réunis dans le tableau VI. Comme on le voyait déjà au tableau V, il apparaît que tous les événements pluvieux exceptionnels sont concentrés sur les mois d'été, en particulier de mai à septembre, avec une forte occurrence en juin. De plus ces épisodes sont géographiquement localisés et ne se retrouvent jamais le même jour sur les pluviogrammes de stations relativement proches.

Malgré la trop courte période couverte par nos recherches et qui ne permet pas une exploitation statistique, il s'avère que les indices d'érosivité des pluies, à l'échelle de l'averse, du mois ou de l'année, peuvent atteindre des valeurs exceptionnelles et justifient entièrement les hypothèses émises dans ce travail.

CONCLUSION

L'équation universelle de perte de sol présente entre autre le grand mérite de résumer en une formule l'ensemble des facteurs impliqués dans l'érosion, facteurs climatiques, topographiques, pédologiques et agronomiques. A la lumière des observations résumées ci-dessus on peut situer les sols du jura vis à vis de ces facteurs.

Le **climat**, considéré comme atlantique au vu de la répartition annuelle des précipitations, présente une composante continentale introduisant écarts thermiques et orages d'été. Si la station de Montbéliard (335 m) se situe bien dans la fourchette de l'indice d'érosivité prévu par Pihan (1978), il faut en revanche admettre un érosivité beaucoup plus forte, bien qu'événementielle, quand on s'élève en altitude.

L'énergie de certaines averses est en tout cas suffisante pour rendre compte des caractères anormaux observés tant dans les sols de dolines (horizons enfouis) que dans l'épaisseur des sédiments lacustres holocènes (couches diétritiques à débris ligneux).

Au point de vue **topographique**, rappelons que les plateaux jurassiques francs-comtois, séparés par des talus étroits et entaillés de vallées encaissées, présentent deux caractéristiques favorisant l'érosion : leur surface est irrégulière, ondulée et faillée et ils sont criblés de dépressions karstiques, dolines ou vallons secs, où les eaux trouvent facilement un exutoire de proximité. La charge des eaux s'y dépose, entraînant à chaque événement une diminution de la couverture pédologique des zones convexes.

Du point de vue **pédologique**, le matériau limono-argileux, le drainage karstique qui engendre les alternances d'humectation-dessication (Blondé et Bruckert, 1989), le taux élevé de matière organique humifiée, la présence de calcium comme cation de liaison, tous ces facteurs sont à l'origine d'une bonne stabilité structurale qui limite le splash et le glaçage superficiel. Mais les agrégats fins se comportent alors comme des entités et sont déplacés intacts jusqu'aux sites collecteurs, dont la géochimie conditionne leur évolution.

Quant aux **facteurs agronomiques**, ils ont à l'évidence un rôle considérable dans l'érosion. Même les moyens rudimentaires utilisés pour les premiers défrichements néolithiques sont à l'origine de remaniements pédologiques, auxquels nous attribuons la dilatation sédimentaire subboréale du remplissage du lac de Chaillexon. Les époques suivantes avaient appris à conserver les sols par des aménagements pertinents. Faisant d'une pierre deux coups, les agriculteurs, contraints à l'épierrage des sols superficiels, avaient quadrillé le terroir de murgers très favorables au maintien des terres.

Nous ne traiterons pas ici de l'outrecuidance technocratique qui a présidé aux remembrements des années cinquante- mais nous attirerons l'attention sur deux données nouvelles dont l'impact sur l'érosion ne semble pas être traité. Il s'agit en premier lieu des pullulations de **campagnols** *(Arvicula terrestris)*, qui affectent ces dernières années les surfaces agricoles, en particulier dans le haut-Jura. Au printemps, la terre des "taupinières" reçoit de plein fouet les premières giboulées et s'étale vers l'aval sur les jeunes pousses des prairies. Il s'agit en second lieu de l'application de **quotas** limitant la production laitière et qui obligent à mettre en culture un terroir qui avait trouvé dans la production herbagère une spécialisation hautement adaptée à ses sols et à son climat.

Ces désordres écologiques et économiques affectent une région dans laquelle l'érosion est insidieuse parce que discontinue, dans l'espace comme dans le temps. A côté des zones "hyper karstiques" qui n'ont jamais pu assurer une fermeture complète de la couverture pédologique (lapiez), les sols de vastes espaces karstiques (photo 4) ne dépassent pas 30 centimètres (Bruckert et Gaiffe, 1990). Toute erreur de gestion peut donc compromettre ce patrimoine pédologique, seule richesse pérenne d'un pays, depuis l'aube de l'humanité.

BIBLIOGRAPHIE

AUCANT, Y., SCHMITT, C. et URLACHER, J.P. (1985) — *Le Verneau souterrain.* Ed. Shag, Besançon, 169 p.

BLONDÉ, J.L. et BRUCKERT, S. (1989) — Corrélations entre flux hydrique, pluviométrie, enracinement des prairies et importance du stock humique des sols calcimagnésiques des plateaux jurassiens. *Pédologie*, XXXIX, (3), 249-259.

BOTTNER, P. (1971) — *La pédogénèse sur roches-mères calcaires dans une séquence bioclimatique méditerranéo-alpine du Sud de la France.* Thèse Doct. Etat, Sciences, Montpellier, 271 p.

BRUCKERT, S. et GAIFFE, M. (1980) — Analyse des facteurs de formation et de distribution des sols en pays calcaire, glaciaire ou karstique. *Ann. Sci. Univ. Besançon,* **4**, Biol.vég., 19-65.

BRUCKERT, S. et GAIFFE, M. (1983) — Essai de séparation des principales fractions organiques des sols : bilan et caractérisation analytique. *C.R. Acad. Sci.*, **297**, 627-630.

BRUCKERT, S. et GAIFFE, M. (1990) — Le systèmes de subsuface sols-roches, modèles de pédogénèses. Exemple des domaines karstiques et non karstiques de Franche-Comté. *Sci. du Sol,* **28**, (4), 319-332.

CAMPY, M., HEIM, J. et RICHARD, H. (1985) — Dynamique du comblement et contexte climatique du remplissage du lac de Chaillexon (Doubs, France). *Ecologia Mediterranea*, **XI**, (1), 135-146.

CHARLES, L.J. et GAIFFE, M. (1990) — Erosion des terres et indices d'érosivité en régime tropical (vallée de Mexico). Essai de modélisation. *Ann. sci. Univ. Fr.-Comté, Géol.*, **4** (10), 47-58.

DI GIOVANNI, C. (1990) — *Fonctionnement d'un système limnologique, basique au cours de l'holocène : l'évolution de la fraction organique dans le remplissage du lac de Chaillexon* (Doubs). DEA. Univ. Bourgogne.

DUQUET, B. (1983) — Expérience de désaturation d'un complexe argilo-humique calcique : conséquences sur la minéralisation de l'azote et les propriétés des agrégats.

ESPITALIÉ, J., LAPORTE, J.L., MADEC, M., MARQUIS, F. *et al.*, (1977) — Méthode rapide de caractérisation de roches-mères, de leur potentiel pétrolier et de leur degré d'évolution. *Rev. Inst. fr. Pét.*, **32**, 23-43.

GAIFFE, M. (1987) — *Processus pédogénétiques dans le karst jurassien. Analyse de la complexation organo-minérale en ambiance calcique.* Thèse Doct. Etat, Sciences, Besançon, 160 p.

GAIFFE, M. (1990) — Erosion of calci-magnesic soils as aggregates in jurassian pedological systems. *Catena*, **17**, 141-149.

GAIFFE, M. et BRUCKERT, S. (1985) — Analyse des transports de matières et des processus pédogénétiques impliqués dans les chaînes de sols du karst jurassien. *Catena, "Soils and geomorphology"*, **6**, 159-174.

GAIFFE, M. et BRUCKERT, S. (1991) — Déterminisme paléoécologique des écosystèmes actuels du Haut-Jura, en relation avec la fracturation des roches. *Ann. Sci. For.*, **48**, 575-591.

GAIFFE, M., DUQUET, B., TAVANT, H., TAVANT, Y. et BRUCKERT, S. (1984) — Stabilité biologique et comportement physique d'un complexe argilo-humique placé dans différentes conditions de saturation en calcium ou en potassium. *Plant and Soil*, **77**, 271-284.

LAURANT, A. et BOLLINNE, A. (1976) — L'érosivité des pluies à Uccle (Belgique). *Bull. Rech. agron. Gembloux*, **11**, 149-168.

PIHAN, J. (1978) — *Annuaire des valeurs mensuelles de l'indice d'érosivité R de Wischmeier relatives aux stations officielles de la météorologie nationale.* Univ. Rennes, 136 p, 24 cartes.

POCHON, M. (1978) — *Origine et évolution des sols du Haut-Jura suisse. Phénomènes d'altération des roches calcaires sous climat tempéré humide.* Thèse Science, Neuchâtel, 190 p.

REMY, J.M. (1989) — *Les transferts particulaires (flux, stocks et bilans) dans un système continental : le bassin de Chaillexon* (Doubs). DEA Univ. Bourgogne.

WISCHMEIER, W. et SMITH, D. (1960) — An universal soil-loss equation to guide conservation farm planning. *7th Int. congr. Soil Sci. (Madison, Wis.)*, **1**, 418-425.

WISCHMEIER, W. et SMITH, D. (1962) — Soil loss estimation as a tool in soil and water management planning. *Assoc. Int. Hydrol. Sci.*, **59**, 148-159.

WISCHMEIER, W. et SMITH, D. (1965) — Predicting rainfall-erosion losses from croxpland, east of the Rocky Mountains. Hanbook n° 282, Washington, U.S. Dep. Agric., 47 p.

Reçu le 20 décembre 1993
Accepté dans sa forme définitive le 10 janvier 1994

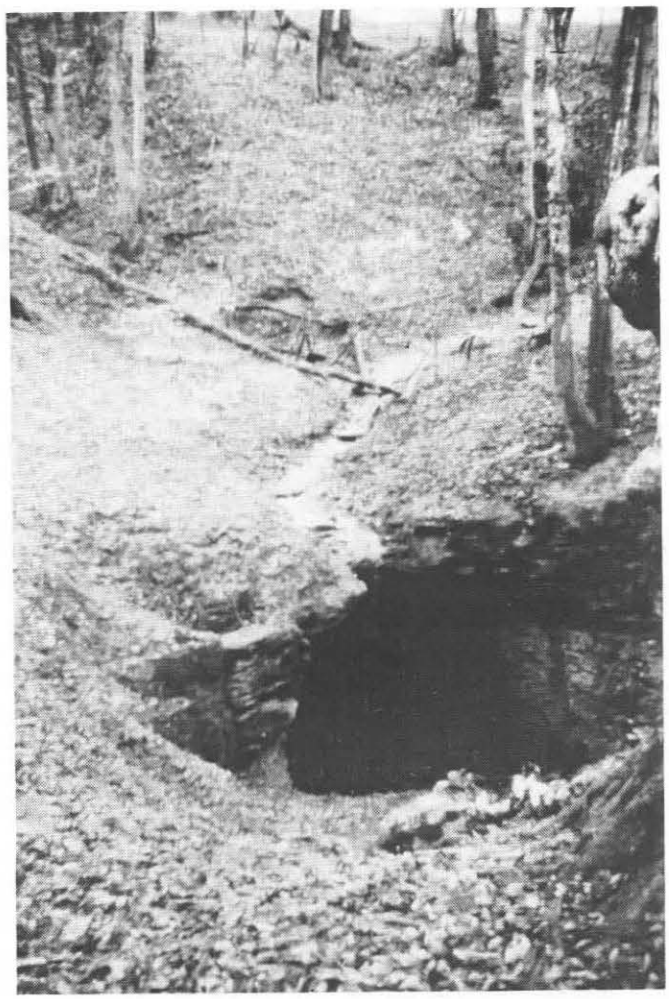

Photo 1 : Ruisseau disparaissant dans une perte.

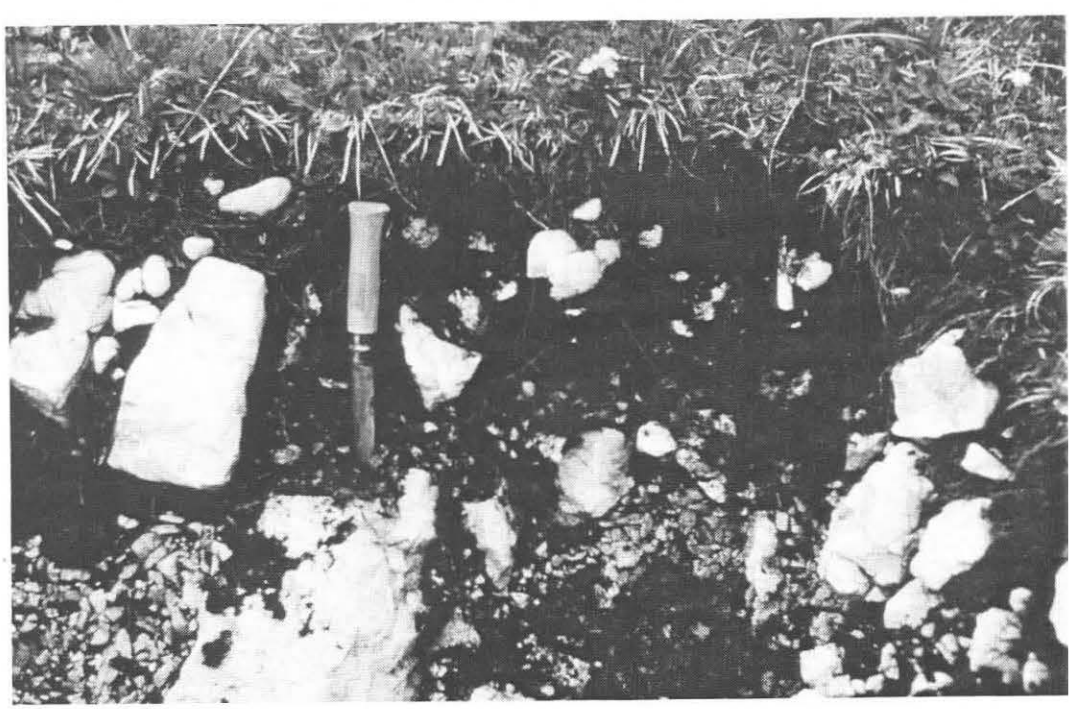

Photo 2 : Sol humo-calcique, formé d'agrégats humifères stabilisés par le calcium.

Photo 3 : Evacuation brutale d'un sol de doline par effondrement du plafond d'un réseau souterrain (Amanceÿ, Doubs).

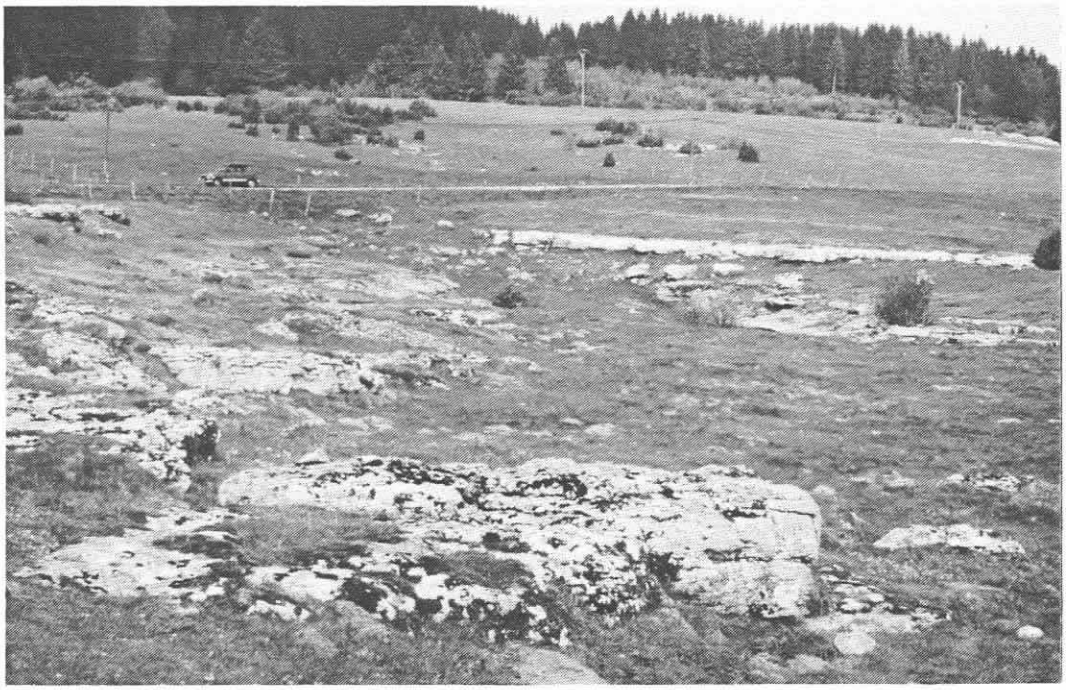

Photo 4 : La production herbagère, meilleure utilisation possible pour contrer l'érosion karstique active des sols très superficiels des plateaux calcaires (Ville-du-Pont, Doubs).